第 37 卷第 21 期 2017 年 11 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.21 Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201608101639
王蕾,张怡婷,张圣新,范德玲,汪贞,石利利,刘济宁.环境条件对伸展摇蚊实验种群繁育的影响.生态学报,2017,37(21):7152-7160.
Wang L, Zhang Y T, Zhang S X, Fan D L, Wang Z, Shi L L, Liu J N.Effects of environmental conditions on the reproduction and development of *Chironomus tentans* (Diptera).Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7152-7160.

环境条件对伸展摇蚊实验种群繁育的影响

王 蕾,张怡婷,张圣新,范德玲,汪 贞,石利利,刘济宁*
环境保护部南京环境保护研究所,南京 210042

摘要:以伸展摇蚊为研究对象,重点考察了温度、光强对各生命阶段存活率和发育速率、成虫性别比和繁殖力以及种群动态的综合影响。通过 *F* 检验不同温度相同光照条件下摇蚊卵、幼虫和蛹的存活率的回归方程和和回归系数,发现了在相同的光强(800 lx 或 2000 lx)条件下,15—35 ℃温度范围内,摇蚊幼虫和蛹两种形态存活率与温度之间均呈显著相关,而幼虫期摇蚊的存活率比蛹期更易受温度影响,但是,温度变化并没有显著影响卵的存活率;且 15 ℃和 35 ℃两个极端温度不适合摇蚊的生存和繁育。其次通过正交试验,对在 2 个温度(15 ℃和 30 ℃)和 2 种光强(800 lx 和 2000 lx)两种因素组合作用下的摇蚊存活率和发育速率进行极差分析和双因素方差分析,得到伸展摇蚊种群繁育的最佳条件为 25 ℃,800 lx 的结论,且两种因素对于摇蚊成虫的雌雄比影响并不显著,但是温度对三者(存活率、发育速率和雌雄比)的影响远大于光强。最后通过单因素方差分析关于不同光照和温度下对成虫繁殖力的结果, 以及相同光照和温度下不同湿度(45%、65%、85%和 95%)对成虫繁殖力的结果,总结出在 25—30 ℃,800 lx 光强下伸展摇蚊维持良好生命活力、顺利完成繁殖发育过程,85%—95%的相对湿度可以使羽化成虫保持较高的产卵水平。并根据所观察的种群生殖力资料计算得到相应温度(25 ℃和 30 ℃)和光照条件(800 lx 和 2000 lx)组合下的实验种群繁殖特征生命表。结果表明在 800 lx 光强、25—30 ℃条件下,摇蚊能维持较高的种群净增殖率(R_0)与内禀增长率(r_m)。综上所述,25 ℃温度,800 lx 光强和 85%的湿度的条件更适合伸展摇蚊种群繁育。此结果为建立伸展摇蚊室内繁育的标准化条件及相应的种群发展规律和构建本土摇蚊种的毒性测试方法奠定了基础。

关键词:伸展摇蚊;温度;光照强度;繁殖发育;种群动态

Effects of environmental conditions on the reproduction and development of *Chironomus tentans* (Diptera)

WANG Lei, ZHANG Yiting, ZHANG Shengxin, FAN Deling, WANG Zhen, SHI Lili, LIU Jining*
Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, *China*

Abstract: The comprehensive influence of survival rate, growth rate of each life stage, adult sex ratio and fertility, and population dynamics of the experimental populations of *Chironomus tentans* were observed under different conditions of temperature and light intensity. Under the condition of different temperatures and same light intensities, the regression equation and regression coefficient of the survival rates of the eggs, larvae, and pupae of *C. tentans* were tested by *F*-test. The results showed that the survival rates of the larvae and pupae of *C. tentans* were significantly correlated with temperature, and the survival rate of larval stage was more likely to be affected by temperature than that of the pupal stage. However, the changes in temperature showed no significant effect on the survival rate of eggs. Two extreme temperatures (15 and 35 ℃) were not found suitable for the survival of *C. tentans*. Secondly, through two combined factors (two temperatures: 15 and 30 ℃ and two light intensities: 800 and 2000 lx) of orthogonal experiments, we concluded that the best breeding conditions of *C. tentans* were 25 ℃ and 800 lx. Moreover, these two factors showed no significant influence on

基金项目:江苏省青年自然科学基金项目(BK20151100)
收稿日期:2016-08-10; **网络出版日期**:2017-07-11
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: ljn@ nies.org

the female male ratio of *C. tentans*. However, the influence of temperature on the three aspects (survival rate, growth rate, and female male ratio) was greater than that of light intensity. At last, we performed the single factor analysis of variance of the results of adult fecundity under different conditions (two temperatures: 15 and 30 ℃; two light intensities: 800 and 2000 lx; and four relative humidity levels: 45%, 65%, 85%, and 95%). The results showed that *C. tentans* can accomplish complete reproductive development under the conditions of 25—30 ℃ and 800 lx. Additionally, a relative humidity between 85% and 95% was another necessary condition to guarantee high oviposition rate. Furthermore, the life tables of the experimental population of *C. tentans* at two temperatures (25 and 30 ℃) and two light intensities (800 and 2000 lx) were established in our laboratory. The net reproductive rate (R_0) and intrinsic rate of natural increase (r_m) reached high levels under the conditions of 25—30 ℃ and 800 lx. To sum up, the conditions of 25 ℃, 800 lx, and 85% relative humidity were found to be optimal for *C. tentans* breeding. These results laid the foundation for establishing the standard conditions for the indoor breeding of *C. tentans*, corresponding population development rule, and toxicity testing method of local *Chironomus* species.

Key Words: *Chironomus tentans*; temperature; light intensity; reproduction and development; population dynamics

环境生物的生存繁育受到温度、光照、湿度等多种环境因子的影响。而对于摇蚊这类经历卵—幼虫—蛹—成虫多次变态发育、生存空间在水—沉积物层、上层水体和水面转换的昆虫而言,温度和光照是影响其全生命周期的重要环境因素,且成虫羽化后还会受到空气湿度的影响[1]。摇蚊的世代周期短,一代摇蚊慢性毒性试验一般为20—65 d,比选用鱼类作试验生物节省时间和经费,用其作为模式生物进行生态毒理学研究具有重要的科学意义。

根据已有研究,不同摇蚊物种对环境温度、光照等条件适应性不同,每一代的羽化时间20—65 d不等,种群发展规律有差异[2]。其中温度和光照对摇蚊生长繁殖影响最为显著[1]。因此虽然不同摇蚊种的繁育条件对本土种的研究有一定参考价值,但为了建立稳定的室内繁育技术和毒性测试技术,探索区域典型摇蚊种生理特性、研究其繁殖发育条件和种群变化规律仍十分必要。鉴于摇蚊在水生态毒性测试中的诸多优势,且物种地理分布的差异性对化学物质的生态危害评估结果有重要影响[3],而影响地域分布差异的主要因素包括温度、光照强度和湿度,所以虽然OECD已建立了 *C. riparius*、*C. yoshimatsui*、*C. dilutus* 等摇蚊种的急慢性毒性试验方法[4-6],但是关于OECD提供的温度和光照等外部条件并不一定是用于本土物种。美国EPA和OECD等发达国家或地区的化学物质生态危害评估导则也明确要求充分考虑本土物种的生态危害性[7-8]。因此建立关于本土生物稳定的室内繁育技术是构建其毒性测试方法的基础。

伸展摇蚊(*Chironomus tentans*)广泛分布于我国新疆,青海,西藏,甘肃,内蒙古,山西,陕西,河南,安徽,河北,山东,江苏等地,是我国常见的摇蚊种之一[9]。由于缺少伸展摇蚊繁殖发育条件的系统研究,因此无法构建相应的毒性测试方法,特别是全生命周期毒性测试方法和多代繁殖毒性测试方法。所以为了评估有毒有害化学物质对我国本土生物的危害性、建立我国广布摇蚊种——伸展摇蚊的室内繁育技术和急慢性毒性及全生命周期毒性测试方法,系统研究温度、光照、湿度等多种环境因子对伸展摇蚊生存繁育影响显得非常必要。

本研究以伸展摇蚊为研究对象,重点研究温度、光照条件对其发育率、存活率、性别比和种群动态的影响,在此基础上提出伸展摇蚊室内繁育的标准化条件及相应的种群发展规律,为构建本土摇蚊种的毒性测试方法奠定基础。

1　材料与方法

1.1　试验生物

伸展摇蚊(*Chironomus tentans*)取自上海化工研究院,已在本实验室驯养几十代。驯养条件参考 *Chironomus riparius* 的养殖条件[6]。将摇蚊幼虫放入18 L玻璃缸中,缸中加入与试验基质相同的水—沉积物

系统,体积不超过缸容积的一半;缸口用纱网罩盖,温和曝气;每日为摇蚊幼虫饲喂粉末状鱼食,每隔 3 d 用虹吸法更换一次上覆水,更换时避免带起缸中的幼虫及其所筑的巢。以此建立的实验种群作为供试虫源。

1.2 试验基质

卵置于 Elendt M7 溶液中孵化,幼虫和蛹选用 Elendt M7 溶液和人工沉积物组成的水—沉积物系统作为培养基质。其中 Elendt M7 溶液的制备方法参考 OECD 化学品测试导则 TG233[6]。人工沉积物的配方包括 5%(干重)泥炭(pH 值 5.9;粉末状,磨细(颗粒大小≤1 mm)且风干)、20%(干重)高岭土、75%(干重)石英砂(粒径在 50—200 μm 的细砂占 60%)和 50%水。

具体配制方法为:首先将泥炭在烘箱内烘干后用粉碎机磨成细粉,在使用旋转搅拌器用去离子水制备所需的泥炭悬浮液,悬浮液的 pH 值为 5.9;然后将悬浮液在(20±2) ℃条件下温和搅拌 2 d 进行驯化以稳定 pH 值并建立稳定的微生物群。驯化后的泥炭悬浮液 pH 值为 6.0±0.5。最后将泥炭悬浮液与 Elendt M7 溶液混合,得到均一的水—沉积物系统。采用 1 L 烧杯盛放水—沉积物系统,并确保水层和沉积物层体积比为 4:1。使用人工配方沉积物具有以下优势:(1)构建了可重复的"标准化基质",无需再找未污染和清洁沉积物,降低实验结果的变异性;(2)不受沉积物季节性变动的影响,且不需预处理沉积物以去除本土动物群系。

1.3 试验方法

将湿度和光周期分别设置为 85%和 16:8(光:暗),设置 4 个温度(15、25、30、35 ℃)和两种光照强度(800 lx、2000 lx),考察温度和光照强度对伸展摇蚊繁育的影响。试验在人工气候箱(MMM Climacell)中开展,同一测试条件的测试容器随机放置。将 Elendt M7 溶液置于培养皿中在上述环境条件下恒温 2 h 后,投入不足 24 h 的新卵开始试验。每种测试条件下放置 3 个培养皿,每皿投入 1 个卵串。试验开始时每 12 h 在 S8APO 体式显微镜(德国 Leica)下统计每个卵串的孵化情况(每个卵串中大概 200—350 粒卵)。待卵孵化为一龄幼虫后,在同一时刻随机选取 100 条一龄幼虫投入盛有水—沉积物系统并已事先恒温的烧杯中,同时对上覆水进行轻微曝气并用纱网封口。每日喂食磨细的鱼食,每 3 d 换一次水,每个处理设置 3 个重复。试验刚开始 10 d 内日喂食量控制在 0.25—0.5 mg/只,后期幼虫长大后将日饲喂量增至 0.5—1 mg/只。每天在体式显微镜底下观察摇蚊的发育情况,记录每种形态(卵、幼虫、蛹、成虫)的发育时间(发育历期即发育时间,发育速率即发育时间的倒数),死亡数和羽化数。并将所有羽化的摇蚊取出并置于新的盛有 Elendt M7 溶液的烧杯中,在同一测试条件下的人工气候箱中开始产卵,记录雌雄成虫的个数和死亡时间,每天将新产出的卵移至培养皿中,统计产卵历期间、卵数及其孵化情况,以方便统计成虫的繁殖力(所有卵的粒数/雌成虫的个数)。

按照试验结果剔除 2 个极端的温度梯度并按照正交试验设置 2 个因素,即温度和光照强度,以此筛选出对伸展摇蚊种群繁育的最佳试验条件。正交试验的每个因素有 2 个水平,采用正交表 $L_4(2^2)$,见表 1。

表 1 正交试验中的影响因素及水平

Table 1 Experimental factors and their levels for orthogonal projects

水平 Level	因素 Factors		水平 Level	因素 Factors	
	A 温度 Temperature/ ℃	B 光照强度 Light intensity/lx		A 温度 Temperature/ ℃	B 光照强度 Light intensity/lx
1	25	800	2	30	2000

鉴于成虫羽化后的繁育除温度和光照外,还可能受到空气湿度的影响,因此在正交试验的最佳水平下选取相应的温度和光照条件,在上述条件的人工气候箱中分别放入刚羽化的 5 对成虫,设置 4 种空气湿度(45%、65%、85%和 95%),以此进一步考察湿度对成虫繁殖力的影响。

1.4 数据处理

(1)利用 SPSS 19.0(IBM,USA)对相关试验结果进行统计分析:不同温度相同光照条件下对伸展摇蚊的卵、幼虫和蛹的存活率计算所得回归方程和回归系数进行 F 检验;对不同温度、不同光照条件下正交试验所得的发育历期和摇蚊总存活率以及雌雄比的结果采用双因素方差分析;采用单因素方差分析(one-way

ANOVA)分析 4 种情况(25 ℃:800 lx、2000 lx;30 ℃:800 lx、2000 lx)下的伸展摇蚊雌雄比和繁殖力的变化。以上数据分析的显著性水平均为 0.05。

(2)参照相关文献[10-11]中的方法,计算得到相应温度和光照条件下的种群净增殖率(R_0)、平均世代周期(T)、内禀增长率(r_m)、周限增长率(λ)和种群翻倍时间(t),组建不同温度、不同光照的伸展摇蚊实验种群繁殖特征生命表。

2　结果

2.1　单因素试验

表 2,表 3 分别表示在相同光照强度(800 lx 或 2000 lx)下摇蚊各形态存活率和 4 个温度水平(15、25、30、35 ℃)的关系。通过模拟出的温度与摇蚊各形态的存活率的方程计算可知,在光照强度为 800 lx(表 2)情况下,温度在 15 ℃和 35 ℃时,幼虫和蛹的存活率均受到抑制,35 ℃条件下,所有测试组卵孵化为一龄幼虫后即死亡;15 ℃条件下的 6 个测试组中,5 组幼虫停止发育,另一组幼虫虽启动发育,但发育速率缓慢。试验进行到第 45 d 时,该组幼虫仅发育至三龄期,所以高温(35 ℃)和低温(15 ℃)条件均无法维持幼虫正常发育。幼虫和蛹的存活率在 25 ℃达到最高值,分别为 92.5%和 98.87%,当温度高于 25 ℃时,各存活率明显下降。幼虫和蛹的存活率的回归方程的相关系数均大于 0.99,显著性差异均小于 0.05,说明所得模型在 15—35 ℃范围内,摇蚊幼虫和蛹两种形态存活率与温度之间均呈显著相关。

表 2　伸展摇蚊各形态存活率(Y,%)和温度(X, ℃)的拟合模型(800 lx)

Table 2　Model of the various stages survival rate (Y,%) and the temperature (X, ℃) for *C. tentans*

发育阶段 Various stages	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2	F	P
卵期 Embryo	$Y=-0.0237X^2+1.3831X+79.298$	0.972	17.454	0.167
幼虫期 Larvae	$Y=-0.9191X^2+45.841X-478$	0.998	921.472*	0.023
蛹期 Pupa	$Y=-1.0096X^2+50.564X-531.71$	0.993	212.033*	0.049

*表示差异显著($P<0.05$)

在光照强度为 2000 lx(表 3)情况下,15 ℃时,幼虫的存活率高于光照强度为 800 lx 时,但是在 25—35 ℃范围内,卵、幼虫和蛹的存活率均低于摇蚊暴露于 800 lx 光照强度下。而在 2000 lx 光照下,15 ℃更适合于摇蚊卵的孵化,卵的存活率达到 98.93%,幼虫和蛹的存活率同样在 25 ℃达到最高值,且回归方程的相关系数均大于 0.99,显著性差异均小于 0.05,说明所得模型在试验温度范围内,摇蚊幼虫和蛹两种形态存活率与温度之间均呈显著相关,而与暴露于 800 lx 光照强度下相同的是,当光照强度为 2000 lx 时,幼虫期摇蚊的存活率比蛹期更易受温度影响,这也反映了幼虫对环境条件变化响应更加敏感的特性。

表 3　伸展摇蚊各形态存活率(Y,%)和温度(X, ℃)的拟合模型(2000 lx)

Table 3　Model of the various stages survival rate (Y,%) and the temperature (X, ℃) for *C. tentans*

发育阶段 Various stages	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2	F	P
卵期 Embryo	$Y=-0.0094X^2+0.3906X+95.257$	0.732	1.362	0.510
幼虫期 Larvae	$Y=-0.7168X^2+35.074X-350.29$	0.995	310.412*	0.040
蛹期 Pupa	$Y=-0.9842X^2+49.291X-518.33$	0.997	211.866*	0.048

*表示差异显著($P<0.05$)

通过图 1 可知,在 15—35 ℃范围内,卵都能保持较高的存活率。在 15 ℃、800 lx 条件下,卵死亡率最高,但也仅为 5.36%。而在 25 ℃时,800 lx 和 2000 lx 光照强度下的存活率分别为 99.4%和 99.2%,所以在这 4 种温度中 25 ℃属于存活率最高的温度条件;而在低温(15 ℃)和高温(35 ℃)条件下,卵的存活率均有所下降。由此可见,在本试验条件下,随着温度的升高,卵的存活率逐渐升高;当超过某一临界温度时,卵的存活率又逐

渐下降。结合表 2 和表 3 分析可以看出,摇蚊卵的存活率与温度变化并没有显著相关,所以本试验所设置的 4 种温度和两种光强对伸展摇蚊卵的存活率影响不大。

2.2 正交试验

由于较高和较低的温度(15 ℃和 35 ℃)条件下,幼虫不能完成世代发育,所以为了确定在多因素条件下伸展摇蚊种群繁育的最佳条件,在单因素的基础试验上,剔除了两个极端温度后,选取适合的参数范围,对温度(A)、光照强度(B),采用 $L_4(2^2)$ 进行正交试验,优化最佳条件见表 4。表 4 中列出了不同温度和光照组合的摇蚊存活率和发育时间的的测定结果,直观的分析可以看出,71.43%的存活率最高,最佳试验条件为 A_1B_1(25 ℃,800 lx),且由于 $R_A>R_B$,因此因素重要性为 A>B(温度比光照重要)。

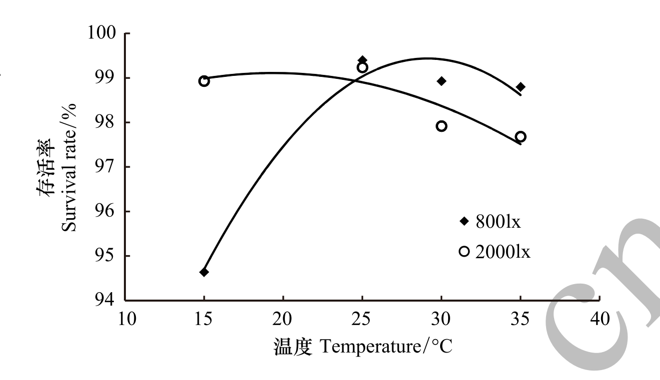


图 1 温度和光照强度对伸展摇蚊卵的死亡率的影响

Fig. 1 Effects of egg mortality of *C. tentans* at different temperature and light intensity

在 25 ℃条件下,卵的平均孵化时间为 1—2 d,幼虫期为 26.1—26.6 d,全世代历期为 32—35 d;30 ℃时,卵的平均孵化时间缩短为 1—1.3 d,幼虫期缩短为 14.7—17.2 d,全世代历期缩短为 20.4—24.5 d。且从表 4 上看,可知发育速率最快的最佳试验条件为 A_2B_2(30 ℃,2000 lx),因素重要性为 A>B(温度比光照重要)。可见,温度和光照的增加有利于缩短发育历期,提高发育速率。

表 4 $L_4(2^2)$ 正交试验设计及结果

Table 4 Application of $L_4(2^2)$ orthogonal projects to assaying survival rate and developmental time from *C. tentans*

水平 Level	A	B	存活率 Survival rate/%	水平 Level	A	B	发育速率 Development rate/d^{-1}
1	1	1	85.43	1	1	1	0.029
2	1	2	64.22	2	1	2	0.031
3	2	1	49.83	3	2	1	0.041
4	2	2	32.68	4	2	2	0.049
K_1	149.65	135.26		K_1	0.060	0.070	
K_2	82.51	96.90		K_2	0.090	0.080	
$\overline{K_1}$	74.83	67.63		$\overline{K_1}$	0.030	0.035	
$\overline{K_2}$	41.26	48.45		$\overline{K_2}$	0.045	0.040	
(极差 Range) R	33.57	19.18		(极差 Range) R	0.015	0.005	
优水平 Optimization level	A_1,B_1			优水平 Optimization level	A_2,B_2		
主次顺序 Order	A>B			主次顺序 Order	A>B		

注:K_i 表示第 i 列上对应水平 1(2,3,4)的数据和;$\overline{K_i}$ 表示为 i(1,2,3,4)水平数据的综合平均;左边的表是关于摇蚊存活率的极差分析;右边是关于摇蚊发育速率的极差分析

表 5 是对试验数据进行双因素方差分析的结果,从表中可以直观的看出,2 个因素对摇蚊存活率和发育速率的影响中,温度对其的影响均大于光照($P_A<P_B$:0.038<0.065 或 0.127<0.330),且温度对摇蚊存活率的影响极其显著(P_A=0.038<0.05)。

所以综上所述,极差分析(表 4)和方差分析(表 5)得出的结论一致,在影响摇蚊存活率和发育速率的因素中,温度为最为重要的因素。在 2 种适当的条件下,伸展摇蚊能顺利完成世代过程。在该温度(25—30 ℃)范围内,升高温度将会可小幅度缩短摇蚊各阶段(卵、幼虫、蛹及成虫)发育历期,提高发育速率,但是这种影响并不显著,而温度能显著影响摇蚊的存活率,因此,在 2 种因素条件下伸展摇蚊种群繁育的最佳条件是 A_1B_1(25 ℃,800 lx)。

表 5　$L_4(2^2)$正交试验极差分析表

Table 5　Application of the data from orthogonal projects with ANOVA

	变异来源 Source of variation	平方和 Quadratic sum	*df*	均方 Mean square	*F*	*P*
存活率	区间	1494.817	2	747.409		
Survival rate	A	1126.945	1	1126.945	273.471*	0.038
	B	367.872	1	367.872	89.270	0.067
	误差	4.121	1	4.121		
	总和	14973.505	4			

	变异来源 Source of variation	平方和 Quadratic sum	*df*	均方 Mean square	*F*	*P*
发育速率	区间	0.000	2	0.000		
Development rate	A	0.000	1	0.000	24.452	0.127
	B	0.000	1	0.000	3.064	0.330
	误差	0.000	1	0.000		
	总和	0.006	4			

* 表示显著($P<0.05$)

图 2 是 25 ℃和 30 ℃条件下温度和光强对伸展摇蚊性别比的影响结果。800 lx 时,雌雄比均接近于 1。而对 4 种情况就雌雄比进行单因素方差分析的结果,在 25 ℃、2000 lx 时雌性显著偏少(雌雄比为 0.65),而在 30 ℃、2000 lx 试验条件下,摇蚊的雌性显著偏多,性别比严重偏离 1(雌雄比为 2.4)。

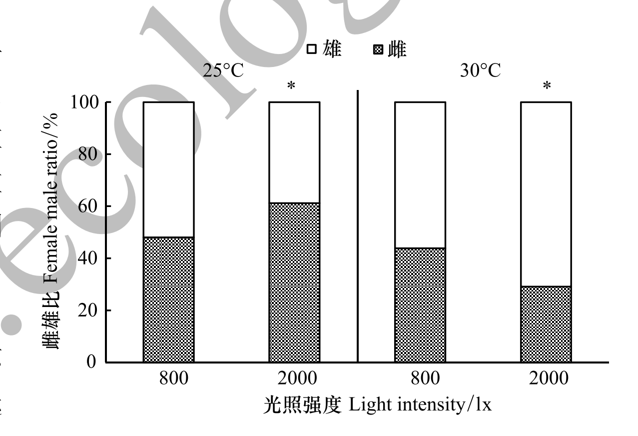


图 2　温度和光照强度对伸展摇蚊性别比的影响

Fig.2　Sex ratio of *C. tentans* at different temperature and light intensity

* 表示差异显著($P<0.05$)

根据正交试验关于雌雄比的方差分析(表 6)结果,可以看出温度和光照对于摇蚊成虫的雌雄比影响并不显著,但是从两者的显著性水平上看,温度的重要性远大于光照强度(P:0.430<0.735),所以,温度对摇蚊性别比的影响远大于光照对其的影响。结合图 2 也可以看出,在相同的光照条件下,不同的温度水平对雌雄比的影响差异极大;而在相同温度下,两种光照强度对雌雄比的影响远小于前一种情况。所以,综合图 2 和表 6,可知温度和光照强度对摇蚊雌雄比均有影响,但其影响均不显著,但温度的影响更大,所以控制好温度范围对试验结果的正确性和合理性更为重要。

表 6　L4(2^2)正交试验方差分析表

Table 6　Application of the data from orthogonal projects with ANOVA

	变异来源 Source of variation	平方和 Quadratic sum	*df*	均方 Mean square	*F*	*P*
雌雄比	区间	1.118	2	0.559		
Female male ratio	A	0.994	1	0.994	1.558	0.430
	B	0.124	1	0.124	0.195	0.735
	误差	0.638	1	0.638		
	总和	9.090	4			

* 表示差异显著($P<0.05$)

2.3　多因素对成虫繁殖力的影响

两种温度和两种光强对伸展摇蚊繁殖力的影响结果如表 7 所示。产卵历期指羽化后开始产卵直至产卵

结束所持续的时间。由结果可知,25 ℃和 30 ℃条件下,产卵历期随温度升高而缩短、随光强增加而缩短。但根据 4 种情况的分析结果表明,仅 30 ℃、2000 lx 光强条件下产卵历期显著低于其他测试组,其他测试组之间并无显著差异。而 30 ℃时每雌产卵量略低于 25 ℃时,但在本实验条件下差异并不显著。

表 7 不同温度和光照强度下伸展摇蚊成虫繁殖力

Table 7 Fecundity of *C. tentans* at different temperature and light intensity

指标 Index	25℃		30℃	
	800 lx	2000 lx	800 lx	2000 lx
每雌产卵量 Every female fecundity/(粒/雌)	321±24	325±29	281±27	285±22
产卵历期 Oviposition duration/d	8.3±0.6	6.3±0.6	6.7±0.6	4.3±0.6*

* 表示显著($P<0.05$)

鉴于成虫羽化后的繁育除温度和光照外,还可能受到空气湿度的影响,因此图 3 表明了在 25 ℃、800 lx 条件下的 4 种空气湿度(45%、65%、85%和 95%)和成虫繁殖力的关系。如图所示,85%和 95%湿度时每雌产卵量显著高于其他两个湿度条件,其中 85%湿度时每雌产卵量最大。所以可以初步判断 4 个湿度中,85%的空气湿度更适合于摇蚊产卵繁育。

2.4 温度和光照强度对实验种群参数的影响

根据 25 ℃和 30 ℃不同光强条件下所观察的种群生殖力资料,计算出种群净增殖率(R_0)、平均世代周期(T)、内禀增长率(r_m)、周限增长率(λ)和种群翻倍时间(t)(表 8)。结果表明,种群净增殖率(R_0)与内禀增长率(r_m)表现出相似的变化趋势,在 800 lx 时明显高于 2000 lx 时,30 ℃、2000 lx 时最小。周限增长率(λ)均大于 1,表明种群在 25 ℃和 30 ℃不同光强条件下均作几何级数增加。30 ℃时种群的平均时代周期明显短于 25 ℃时,30 ℃、800 lx 时种群翻倍时间(t)最短。虽然 30 ℃时每雌产卵量略低于 25 ℃时,但 30 ℃时雌性子代比例增加,说明种群通过调整雌雄比来抵御外在环境的变化。

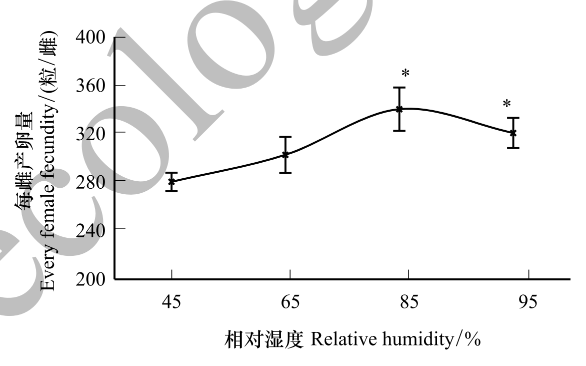


图 3 湿度对伸展摇蚊成虫繁殖力的影响

Fig.3 Sex ratio of *C.tentans* at different relative humidity

* 表示差异显著($P<0.05$)

表 8 不同温度和光照强度下伸展摇蚊的实验种群生命表参数

Table 8 Life table parameters of experimental population for *C. tentans* at different temperature and light intensity

指标 Index	25℃		30℃	
	800 lx	2000 lx	800 lx	2000 lx
净增殖率 Net reproductive rate (R_0)	56.16	37.04	44.26	7.77
平均世代周期 Mean generation time (T)	29.58	29.15	19.65	17.67
内禀增长率 Intrinsic rate of natural increase (r_m)	0.136	0.128	0.193	0.116
周限增长率 Finite rate of increase (λ)	1.145	1.136	1.213	1.213
种群翻倍时间 Population doubling time (t)	5.10	5.42	3.59	5.98
子代雌雄比 Female male ratio	1.05∶1	0.65∶1	1.29∶1	2.40∶1

3 讨论

根据上面的试验分析结果可知温度和光强对伸展摇蚊各生命阶段存活率和发育率、成虫性别比和繁殖力均有影响,其中温度是最主要的因素。而本试验所设置的 4 种温度和两种光强对伸展摇蚊卵的存活率影响不大,摇蚊卵的存活率与温度变化并没有显著相关,出现上述现象的原因可能是由于卵外包被的卵壳在一定程

度隔绝了外界不良环境条件的影响有关[12]。25—30 ℃是确保伸展摇蚊顺利完成世代发育过程的适宜温度范围,在此温度范围内升温有助于缩短其发育历期。25 ℃、800 lx 光强可以维持伸展摇蚊雌雄比接近于 1,从而确保种群稳定发展。高温(30—35 ℃)和强光(2000 lx)是导致伸展摇蚊死亡率提高的重要原因,25 ℃、800 lx 时卵、幼虫、蛹的死亡率均最低,可以作为摇蚊种繁育的最佳条件。25—30 ℃、800—2000 lx 条件未对伸展摇蚊成虫单雌繁殖量产生显著影响,但高温(30 ℃)、强光(2000 lx)的综合作用显著缩短了成虫产卵历期。而对于羽化成虫而言,85%—95%的相对湿度可以保证较高的产卵水平。

种群参数的变化是种群动态的重要体现,而生命表则是获取种群参数的重要工具。根据不同温度和光强条件下伸展摇蚊实验种群生命表的研究结果,800 lx 光强、25—30 ℃时实验种群均维持较高的净增殖率(44.26—56.16),且在此范围内升温可将平均时代周期从 29.58 d 缩短至 19.65 d,并由此导致内禀增长率由0.136升高至 0.193.这说明伸展摇蚊在高温下采取了缩短寿命的生态对策,从而抵消了高温下生殖力降低的不利影响。在此条件下,伸展摇蚊种群数量每日增长 1.145—1.213 倍,并在 3.59—5.10 d 实现种群翻倍。

综合考虑温度和光强对伸展摇蚊各生命阶段存活率和发育速率、成虫性别比和繁殖力以及种群动态的影响,800 lx 光强、25—30 ℃是保证摇蚊维持良好生命活力、顺利完成繁殖发育过程并维持稳定种群动态的适宜环境条件。为了保证羽化成虫较高的产卵水平,还应维持 85%—95%的相对湿度。值得注意的是,本研究也证实伸展摇蚊幼虫是对外界胁迫响应最为敏感的生命阶段。因此保持适宜环境条件确保其存活率、发育率的基础上采用幼虫作为伸展摇蚊急性毒性测试的材料是比较合适的。本研究所得到的温度、光强及湿度对伸展摇蚊生长繁育的影响规律与前人所得到的环境条件对其他摇蚊种(*Chironomus riparius*、*Chironomus kiiensis*、*Chironomus dorsalis*)的影响规律相似,但最适宜的繁育条件参数有所不同[1,13-16]。

4　结论

以我国广布摇蚊种——伸展摇蚊为研究对象,本研究重点考察了温度、光强对各生命阶段存活率和发育速率、成虫性别比和繁殖力以及种群动态的综合影响,结果表明:

(1)在相同的光强(800 lx 或 2000 lx)条件下,15—35 ℃温度范围内,摇蚊幼虫和蛹两种形态存活率与温度之间均呈显著相关,而幼虫期摇蚊的存活率比蛹期更易受温度影响,这也反映了幼虫对环境条件变化响应更加敏感的特性。但是在试验条件范围内,温度的变化对伸展摇蚊卵的存活率影响不大,卵的存活率与温度变化并没有显著的相关性。且 15 ℃和 35 ℃两个极端温度不适合摇蚊的生存和繁育。

(2)通过双因素作用下摇蚊存活率和发育速率的分析,我们得出温度的重要性远大于光照强度,伸展摇蚊种群繁育的最佳条件是 25 ℃,800 lx 的结论。且温度和光照对于摇蚊成虫的雌雄比影响并不显著,而在最佳条件下(25 ℃,800 lx),摇蚊的雌雄比为 1.05,更接近于 1。

(3)800 lx 光强、25—30 ℃是保证伸展摇蚊维持良好生命活力、顺利完成繁殖发育过程,而 85%—95%的相对湿度是保证羽化成虫较高的产卵水平的必要条件。

(4)伸展摇蚊幼虫是对外界胁迫响应最为敏感的生命阶段。在保持适宜环境条件确保其存活率、发育率的基础上采用幼虫作为伸展摇蚊急性毒性测试的材料是比较合适的。

参考文献(References):

[1] 方俊峰, 雷晓玲, 曹天洪, 宗祖胜. 环境因子对摇蚊幼虫存活的影响及杀灭试验研究. 净水技术, 2007, 26(1): 1-3.

[2] 王雪龙. 摇蚊幼虫种类鉴定、龄期划分及各虫态发育历期的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.

[3] Wu F C, Meng W, Zhao X L, Li H X, Zhang R Q, Cao Y J, Liao H Q. China embarking on development of its own national water quality criteria system. Environmental Science & Technology, 2010, 44(21): 7992-7993.

[4] Organisation for Economic Co-operation and Development. Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 218: Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Sediment. Paris: OECD, 2004.

[5] Organisation for Economic Co-operation and Development. Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 219: Sediment-Water Chironomid

Toxicity Using Spiked Water. Paris：OECD, 2004.

[6] Organisation for Economic Co-operation and Development. Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 233：Sediment-Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test Using Spiked Water or Spiked Sediment. Paris：OECD, 2010.

[7] United States Environmental Protection Agency. Using toxicity tests in ecological risk assessment. Intermittent Bulletin. EPA, 1994.

[8] OECD. Guidance Document for Aquatic Effects Assessment. OECD Environment Monographs No. 92. Paris：OCED, 1995.

[9] 姜永伟. 中国摇蚊属系统学研究[D]. 天津：南开大学, 2011.

[10] 吴坤君, 陈玉平, 李明辉. 温度对棉铃虫实验种群生长的影响. 昆虫学报, 1980, 23(4)：358-368.

[11] 孙兴滨. 摇蚊幼虫生态学特征及其在水处理过程中去除技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2006.

[12] Wang W B, Leopold R A, Nelson D R, Freeman T P. Cryopreservation of *Musca domestica* (Diptera：Muscidae) embryos. Cryobiology, 2000, 41(2)：153-166.

[13] Park K, Kwak I S. The effect of temperature gradients on endocrine signaling and antioxidant gene expression during *Chironomus riparius* development. Science of the Total Environment, 2014, 470-471：1003-1011.

[14] 方海平, 陈再忠. 光照诱导对摇蚊产卵的影响. 江苏农业科学, 2013, 41(10)：327-330.

[15] Sun X B, Lu Y, Sun L, Cui F Y. Effect of temperature on laboratory population of *Chironomus kiiensis*. Journal of Harbin University of Commerce：Natural Sciences Edition, 2013, 29(3)：292-297.

[16] 孙兴滨, 王树涛, 崔福义. 二氧化氯对水源水中摇蚊幼虫灭活效果的研究. 中国环境科学, 2009, 29(6)：617-621.

